

Reconstrucción topográfica a partir de iluminación estructurada. Su aplicación en Radioterapia Externa

L. Garavaglia^{1,2}, L. Mairal^{2,4}, J. Runco^{2,3}

¹ INIFTA Inst.de Investig.Fisicoquímicas Teóricas y Aplicadas UNLP – CONICET

² Depto.de Física – Facultad de Cs.Exactas – UNLP

³ IFLP – Instituto de Física La Plata – CONICET

⁴ Mevaterapia Centro Médico, Buenos Aires, Argentina
{runco@fisica.unlp.edu.ar}

Resumen: En tratamientos de radioterapia el objetivo es entregar al tumor la dosis de radiación prescripta por el médico, minimizando la irradiación de los tejidos sanos. Para ello el paciente debe ser ubicado en la camilla en la posición respecto del equipo establecida en la etapa de planificación. En tratamiento de cabeza y cuello suele usarse una máscara termoplástica personalizada como accesorio de inmovilización y posicionamiento. La iluminación estructurada permite obtener las dimensiones espaciales de un objeto iluminándolo utilizando un patrón de franjas y fotografiándolo desde un lugar predeterminado. Si se conocen las dimensiones del objeto, puede calcularse la forma de las franjas que debe proyectarse para que solo cuando el mismo ocupe su posición conocida inicialmente, se vea en la fotografía el patrón original de franjas. En tratamientos de radioterapia, esta técnica puede usarse para mejorar la repetitividad del posicionamiento del paciente en la camilla de tratamiento ya que durante el proceso la cara del paciente sufre modificaciones. El presente trabajo muestra el desarrollo de una herramienta de software que permite verificar cuantitativamente el correcto posicionamiento de un objeto en las condiciones experimentales correspondientes a la geometría de tratamientos de radioterapia externa y detectar simultáneamente eventuales cambios morfológicos de dicho objeto. El monitoreo del posicionamiento del paciente mediante esta técnica tiene tres ventajas importantes: en términos de protección radiológica no agrega dosis de radiación frente a las placas verificadoras, podría reemplazar a las máscaras de inmovilización y facilita la verificación durante el tratamiento.

Palabras clave: Procesamiento de señales, sensores, radioterapia, iluminación estructurada.

1. Introducción

Radioterapia es el uso de las radiaciones ionizantes para tratar el cáncer, que junto con la Cirugía y la Quimioterapia constituyen las tres principales modalidades médicas que tienen esta finalidad [1]. La Radioterapia Externa se basa

en irradiar el tejido maligno desde el exterior del paciente, siendo el acelerador lineal de electrones (LINAC) el equipo más usado para ello. La Braquiterapia en cambio, es la rama de la Radioterapia que entrega la dosis de radiación en contacto o estrecha proximidad con el tejido enfermo, haciendo uso de fuentes radiactivas [2].

Las radiaciones ionizantes alteran el normal funcionamiento de los tejidos vivientes, pudiendo impedir la proliferación de las células y llegando incluso hasta provocar la muerte de las mismas [3]. Es por esto que uno de los principios fundamentales de la Radioterapia es entregar la dosis prescrita al tumor, minimizando la irradiación de los tejidos sanos [4]. Para cumplir este requerimiento básico, se debe reproducir la posición del paciente, en la camilla de tratamiento, establecida en la adquisición de las imágenes tomográficas indispensables para la planificación del tratamiento radiante. Es de fundamental importancia que esta posición se repita en cada fracción de tratamiento con la precisión y exactitud según las tolerancias (en general del orden de algunos mm) correspondientes a la técnica de irradiación aplicada [5].

La iluminación estructurada permite obtener las dimensiones espaciales de un objeto iluminándolo con un patrón de franjas y fotografiándolo desde un lugar predeterminado [6]. Pero si se conocen las dimensiones del objeto, como en el caso de un paciente de Radioterapia, esta técnica puede usarse para mejorar la reproducibilidad y repetitividad del posicionamiento del paciente. Cambios en los contornos externos del paciente, como los producidos por una Quimioterapia coadyuvante o el uso de corticoides, podrían detectarse antes del inicio de una fracción, lo mismo que los desplazamientos de la posición correcta de tratamiento.

Como ya se ha mencionado, la posición del paciente sobre la camilla de tratamiento debe reproducir lo más fielmente posible la posición de referencia que se tenía durante la adquisición de imágenes, obtenidas típicamente mediante tomografía computada de rayos X. Con estas imágenes se inicia el proceso de planificación, donde se establece la posición de tratamiento en la que el campo de radiación atraviesa la región donde se encuentra la lesión, y llevando a cabo los cálculos de los tiempos de irradiación.

Los técnicos operadores de equipos de Radioterapia se encargan de posicionar al paciente en la unidad de tratamiento haciendo coincidir el isocentro del Linac con el isocentro correspondiente a la planificación de su tratamiento. Para ello se utiliza la proyección de láseres visibles con los tres puntos de referencia tatuados sobre la piel del paciente, dos laterales y uno anterior. El cruce de las líneas rectas luminosas de los láseres del bunker de tratamiento permite visualizar el isocentro del Linac que se hace coincidir en el paciente, con la ayuda de los tatuajes de referencia y según planificación (figura 1). Toda inexactitud en el posicionamiento conlleva una inadecuada distribución de dosis y por lo tanto es crucial alcanzar una precisa repetitividad de la posición correcta a lo largo de las fracciones. En tratamientos de cabeza y cuello suele usarse una máscara inmovilizadora termoplástica personalizada (figura 2). Las máscaras termoplásticas deben ajustarse perfectamente a la superficie del paciente. El plan de tratamiento

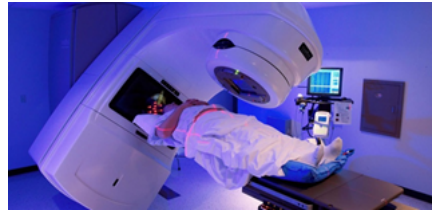


Figura 1. Láseres rojos de posicionamiento cruzándose en el isocentro con paciente sobre la camilla de tratamiento

tiene en cuenta la influencia dosimétrica de dicho elemento externo, y si aparecen “gaps” de aire entre este y la piel del paciente, la distribución de dosis que efectivamente recibe el paciente se aleja de la prescripción [7]. Algunos pacientes pueden inflamarse o adelgazar notablemente durante el curso de la terapia, y en ciertos casos, la máscara puede hasta dejar de cumplir su función inmovilizadora. Siendo la proyección de franjas una técnica segura desde el punto de vista de la



Figura 2. Paciente con máscara termoplástica en posición de tratamiento

radioprotección, es decir que no existe radiación ionizante involucrada, su uso puede repetirse tantas veces sea necesario. Incluso el monitoreo continuo de la posición del paciente es una potencial aplicación de la técnica a fin de evitar movimientos “intra-fracción” fuera de la tolerancia. Esto último es particularmente útil en el supuesto caso de usarla en reemplazo de la máscara inmovilizadora.

2. Descripción de la técnica y sistema de medida

La obtención de la topografía de un objeto mediante iluminación estructurada comienza por posicionar a este último sobre una superficie plana, para luego iluminar ambos plano y objeto con un patrón luminoso dado[8]. Si el plano y el objeto iluminados se observan siempre desde un punto fijo en el espacio, el patrón luminoso se modifica de manera particular según sea la forma del objeto. De esta manera, el patrón así modificado contiene la información topográfica del objeto (figura 3). La virtud de esta técnica reside en obtener las dimensiones espaciales de objetos tridimensionales sin necesidad de hacer contacto con ellos, sino simplemente observándolos. El patrón luminoso puede generarse de distin-

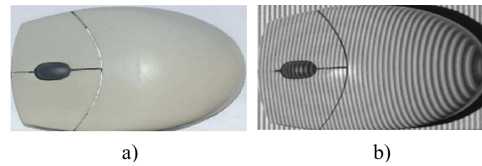


Figura 3. a). Fotografía de un mouse sobre una superficie plana de referencia. b). El mouse y el plano de referencia de la foto a) iluminados con un patrón de franjas de perfil sinusoidal.

tas maneras, por ejemplo iluminando adecuadamente una diapositiva de franjas con variación de niveles de gris siguiendo un perfil sinusoidal, dientes de sierra o rectangular. También se puede obtener un patrón de franjas con perfil sinusoidal por interferencia, usando láser. Otra forma comúnmente usada es mediante un proyector (cañón). Con un dispositivo de este tipo se tiene la posibilidad de generar por computadora diferentes tipos de patrones, sólo limitados por el tamaño de pixel y la profundidad de campo (la distancia dentro de la cual está en foco la proyección), ya que la iluminación no se restringe a un plano, sino que justamente se realiza sobre un objeto tridimensional.

Uno de los patrones más simples es la grilla de Ronchi, que consiste en franjas uniformemente espaciadas, con una distribución de intensidad luminosa tipo escalón, es decir que en una grilla blanco y negro, se alternan las franjas blancas y negras sin aparición de tonos grises (figura 4). El punto de observación se resuelve mediante el uso de un proyector y una cámara fotográfica ubicados de manera que sus ejes ópticos se encuentren perpendiculares al plano de proyección de la grilla de Ronchi.

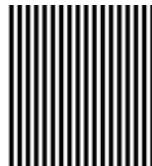


Figura 4. Grilla de Ronchi en blanco y negro.

La figura 5.a) muestra una vista superior, para el caso en el que se observa con la cámara un punto localizado en s , que se proyecta sobre una de las franjas. P y C simbolizan respectivamente al proyector y la cámara, P' y C' los puntos sobre el plano de referencia a donde llegan los rayos que representan los ejes ópticos que también se ilustran. Luego, al colocar un objeto por sobre el plano de referencia y según el punto de vista de la cámara, el punto s parece situarse en b (figura 5.b).

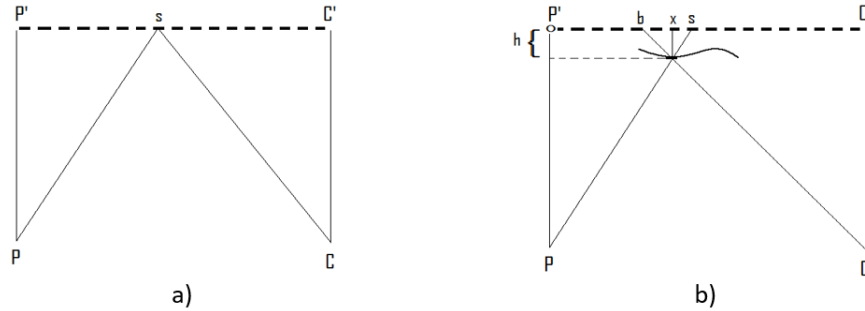


Figura 5. Vista superior del punto s proyectado sobre una de las franjas del patrón. P y C simbolizan las ubicaciones del proyector y la cámara respectivamente.

Finalmente, la altura h del objeto se calcula de la siguiente forma considerando al punto P' el origen de coordenadas:

$$h = \|s - b\| \left[\frac{\|C' - b\|}{\|C - C'\|} + \frac{\|s\|}{\|P - P'\|} \right]^{-1} \quad (1)$$

donde $\|\cdot\|$ es la función módulo de un vector. Por lo tanto, $\|s - b\|$ representa el desplazamiento que sufre el punto localizado en s luego de haberse colocado el objeto. Denominando $\|P - P'\| = \|C - C'\| = d$, la ecuación (2) muestra la forma en la que este desplazamiento sólo depende de la altura del objeto a medir, dado que C' y d están fijados por la elección de la geometría del experimento. La deducción completa de las ecuaciones puede encontrarse en [9] [10].

$$\|s - b\| = \frac{\|C'\| h}{\text{abs}(d - h)} \quad (2)$$

En base a lo anterior y haciendo el paso inverso, si se conoce el valor de h es posible calcular los valores s y b conociendo la ubicación del proyector y la cámara. Luego, la iluminación estructurada puede usarse como técnica de posicionamiento de objetos de dimensiones conocidas.

Cuando se obtiene la topografía de un objeto mediante iluminación estructurada, el patrón de franjas se deforma, y así se obtiene la información tridimensional. Luego existe una sola proyección de franjas ya deformadas, que cuando iluminen el objeto para el cual han sido deformadas (o formadas), las franjas se vean perfectamente verticales, paralelas y equidistantes en una imagen. A partir de un objeto cuyas dimensiones espaciales son conocidas, se puede hallar una imagen de franjas específicamente moldeadas para que cuando dicho objeto se posicione en un lugar elegido de antemano, sobre el plano de referencia, todas las franjas que se observen con la cámara fotográfica se ajusten a un patrón como el de Ronchi, por ejemplo. Podría decirse que es la operación inversa para la medición de un objeto mediante proyección de franjas. Con esta inversa, un objeto ya conocido es quien dicta la forma que deben tener las franjas para que al ser

proyectadas sobre él, se obtenga un patrón de franjas dado. Por lo tanto, hay un solo lugar sobre el plano de referencia donde puede situarse el objeto para que las franjas observadas sean un patrón específico. Además, si el objeto conocido sufre cualquier suerte de cambio en su forma, será evidente que ya no pueda volver a observarse el patrón cuando se le proyecten las franjas modificadas para posicionamiento.

3. Resultados obtenidos

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó un Proyector SONY VPL-ES5 con sistema de proyección de 3 paneles LCD y 1 objetivo con zoom de 1,2 aumentos. Un panel SVGA de 800 x 600 pixels (0,48 Megapixels) y un panel por cada componente del RGB. La cámara fotográfica utilizada fue una Canon PowerShot A590 IS con una resolución de 3264 x 2448 pixels (8 Mp), zoom óptico de 4 aumentos y conexión mini USB sólo para transmisión de datos.

El tipo de patrón usado fue una grilla de Ronchi de 600 x 800 pixeles pudiendo seleccionarse la cantidad, el ancho y el color de cada franja así como la separación entre ellas. El color fue representado en RGB y resultó de suma utilidad para determinar la correspondencia entre la posición del objeto y el patrón generado.

Para medir el desempeño de la iluminación estructurada en el relevamiento de topografías simples se utilizaron los objetos de la figura 6, y son: i) Un semicilindro de 17,5 cm de alto y radio 5 cm, simula el cuello de un paciente. ii) Una semiesfera de 7 cm de radio y una esfera de 10.7 cm de radio, simulan la cabeza de un paciente.



Figura 6. Figuras con dimensiones equivalentes a la cabeza y cuello de pacientes sobre las que se realizó un relevamiento topográfico utilizando iluminación estructurada.

En las figuras 7 y 8 pueden verse los resultados del relevamiento topográfico del semicilindro y las semiesferas realizados con el software desarrollado. Se pudo comprobar que la diferencia entre las dimensiones medidas del semicilindro hechas con iluminación estructurada y las dimensiones reales fueron inferiores

a 1 mm para todos los pixels. Para las semiesferas, estas discrepancias fueron todas inferiores a 2 mm.

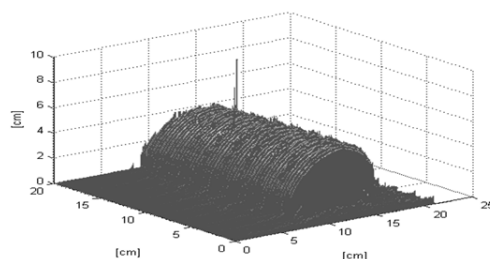


Figura 7. Reconstrucción del semicilindro utilizando el resultado del relevamiento topográfico realizado con el software desarrollado.

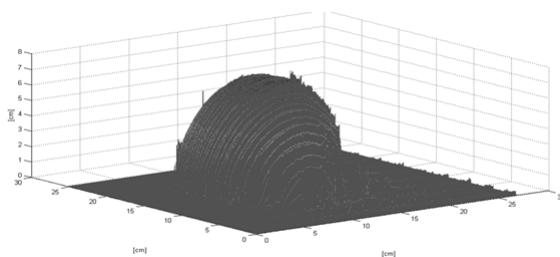


Figura 8. Reconstrucción de una de las semi esferas a partir del relevamiento topográfico correspondiente.

La figura 9 muestra una sustracción de imágenes entre una semi esfera generada computacionalmente y la reconstrucción realizada utilizando el relevamiento topográfico. En ella puede observarse que las mayores discrepancias se encuentran en los bordes (zonas claras) mientras que en la zona central es la que presenta la mejor correspondencia.

Este relevamiento topográfico resulta sumamente útil para determinar la ubicación correcta en la debe posicionarse el paciente. Es un enfoque diferente al utilizado habitualmente cuando se trabaja con iluminación estructurada ya que en este artículo, el énfasis no está puesto en determinar la topografía de un objeto sino su ubicación según un patrón dado.

En el caso particular de la radioterapia, el objeto cuya topografía interesa analizar es la cabeza o el cuello del paciente. La posibilidad de calcular esta ubicación reiteradas veces, es fundamental en estos casos, dado que se trata de procedimientos de varias sesiones a través del cual, la zona irradiada modifica

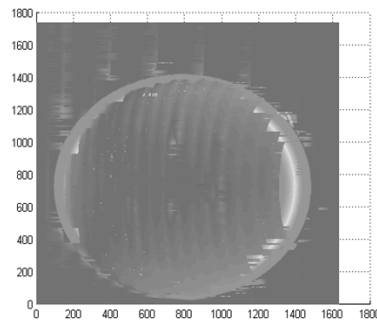


Figura 9. Sustracción entre una semi esfera generada computacionalmente y el resultado obtenido de la reconstrucción basada en el relevamiento topográfico. La zona central (más oscura) es la que posee mayor precisión.

su forma sustancialmente. Actualmente este proceso requiere de una tomografía de rayos X, la cual afecta el cuerpo del paciente al irradiarlo innecesariamente.

Utilizando nuevamente una de las semi esfera para simular la cabeza del paciente, se proyecta sobre ella el patrón de franjas de la figura 10.a) obteniendo como resultado lo que se observa en la figura 10.b). Luego, este patrón deformado será utilizado como el patrón de referencia, para iluminar al objeto que se desea posicionar. Sólo cuando dicho objeto se encuentre en el lugar esperado, el patrón volverá a verse como en la figura 10.a)

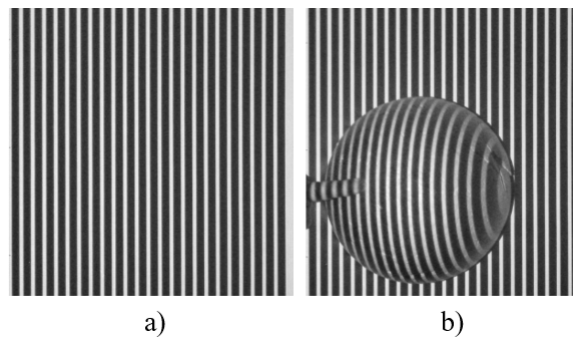


Figura 10. a) Ilustración del patrón de referencia; b) Objeto ubicado arbitrariamente en un lugar diferente al esperado.

La secuencia de imágenes que se muestra en la figura 11 ilustra el posicionamiento en sí, y la forma en la que gradualmente las franjas ubicadas sobre el objeto toman la forma del patrón generado como se indicó para la figura 10.b). A medida que la semiesfera se acerca al lugar correcto, las franjas que se proyectan sobre ella van tomando la forma vertical esperada. La figura 11.d) muestra

la mejor alineación conseguida. En dicha imagen, la posición de la semiesfera se encuentra a menos de 4 mm de la posición correcta, entendiendo por tal la que la alinea con el patrón. Puede verse que el mejor posicionamiento al que

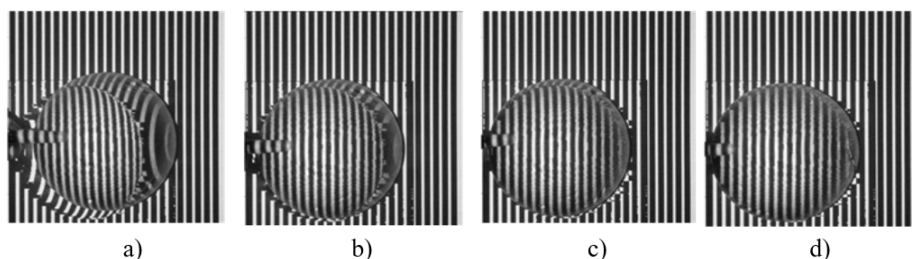


Figura 11. Secuencia de posicionamiento de la semi esfera utilizando el patrón generado a partir del relevamiento topográfico

se llegó en esta prueba (Figura 11.d)) exhibe un buen acuerdo con lo esperado, es decir, llegar a ver sólo el patrón constituido por franjas iguales, paralelas y equidistantes.

4. Conclusiones

Se ha desarrollado un software que permite relevar la topografía de objetos utilizando la iluminación estructurada llegando a alcanzar una exactitud del orden de los 2 mm. La iluminación estructurada es una técnica que permite obtener información espacial tridimensional a partir de información bidimensional, el conocimiento de la geometría del experimento y de las características de la proyección y la adquisición de las imágenes.

Este artículo propone un nuevo uso de la iluminación estructurada ya que utiliza las dimensiones del objeto, independientemente de la manera en que hayan sido obtenidas, para posicionarlo en una ubicación predeterminada. Esto se realiza a través de un nuevo patrón de franjas generado a partir de la información topográfica que al ser proyectado sobre el objeto estará conformado por franjas verticales cuando el mismo se encuentre en la posición correcta. Es importante considerar que se trata de un proceso que puede verificarse de manera inmediata con la sola inspección ocular por parte del operador. Independientemente de esto, se ha comprobado que el posicionamiento más adecuado sólo presenta una diferencia máxima de 4 mm siendo éste un valor aceptable según el criterio médico [11].

Con respecto a la potencial aplicación clínica de la técnica en radioterapia externa se propone utilizar la tomografía computada para planificación del paciente en posición de tratamiento y generar con ella la imagen de posicionamiento para ser proyectada en el bunker de tratamiento. Así la iluminación estructurada constituiría una herramienta poderosa para garantizar la reproducibilidad y

repetitividad de la posición del tratamiento. Nótese que se trata de un procedimiento no invasivo que puede reproducirse a lo largo del tratamiento

Especial interés podría tener su uso como sustituto de la máscara inmovilizadora ya que la misma tiene un costo elevado y en a lo largo del tratamiento no se ajusta adecuadamente a los cambios en la fisonomía del paciente.

Referencias

1. E.B. Podgorsak. *Radiation Oncology Physics*. International Atomic Energy Agency, 2005.
2. F.M. Khan and J.P. Gibbons. *Khan's The Physics of Radiation Therapy*. Wolters Kluwer Health, 2014.
3. M. Tubiana. *Radiobiología: Radioterapia y Radioprotección. Bases Fundamentales*. Hermann, medicina, 2012.
4. S. Webb. *The Physics of Three Dimensional Radiation Therapy - Reprinted with corrections*. Series in Medical Physics and Biomedical Engineering. IOP Publishing, 2001.
5. ICRU. Prescripción, registro y elaboración de informes en la terapia con haces de fotones. reporte técnico 62. Technical report, ICRU, 1999.
6. Sai Siva Gorthi and Pramod Rastogi. Fringe projection techniques: Whither we are? *Optics and Lasers in Engineering*, 48(2):133 – 140, 2010. Fringe Projection Techniques.
7. P. Mayles, A. Nahum, and J.C. Rosenwald. *Handbook of Radiotherapy Physics: Theory and Practice*. CRC Press, 2007.
8. R. Windecker and H. J. Tiziani. Topometry of technical and biological objects by fringe projection. *Appl. Opt.*, 34(19):3644–3650, Jul 1995.
9. M. Wördemann. *Structured Light Fields: Applications in Optical Trapping, Manipulation, and Organisation*. Springer Theses. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
10. D.L. Andrews. *Structured Light and Its Applications: An Introduction to Phase-Structured Beams and Nanoscale Optical Forces*. Elsevier Science, 2011.
11. S. Lahrman, O. Jäkel, and C. P. Karger. Investigation of acceptance criteria for the gamma-index in scanned carbon ion radiotherapy. In Olaf Dössel and Wolfgang C. Schlegel, editors, *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, September 7 - 12, 2009, Munich, Germany*, pages 231–233, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer Berlin Heidelberg.